Turboréacteur
Turbofan engine

1976

Snecma M88-2

Mise en service *Entry into service*	2001
Poussée sans PC *Dry thrust*	50 kgN *11 200 lb*
Poussée avec PC *Afterburning Thrust*	75 kgN *16 900 lb*
Consommation spécifique (en sec) *Specific consumption in dry*	0.80 kg/kgp/h
Consommation spécifique avec PC *Specific consumption with AB*	1.70 kg/kgp/h
Température entrée turbine (TET) *Turbine inlet temperature (TIT)*	1 577 °C *1 850 °K*
Débit d'air *Air flow rate*	65 kg/s *143 lb/s*
Taux de compression *Overall pressure ratio*	24.5
Taux de dilution *By-pass ratio*	0.30
Longueur *Length*	3 m 53 *11.58 in*
Diamètre *Diameter*	0 m 69 *27.4 in*
Masse *Weight*	897 kg *1 978 lb*

Avions équipés avec ce moteur : Rafale C, B et M
Aircraft equipped with this engine: Rafale C, B and M

Le M88 : le moteur du 3ème millénaire

Fin des années soixante-dix, l'armée de l'Air et la Marine expriment leur besoin pour un nouvel avion de chasse afin de remplacer cinq types d'avions : il doit être multirôle (air-air, air-sol, dissuasion) capable d'évoluer depuis un porte-avions, tout en étant robuste, discret, maniable et afficher une grande capacité d'emports. Un vrai défi !

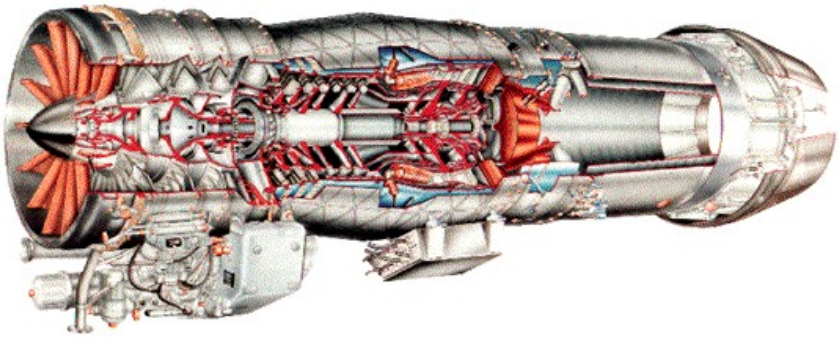
Conçu pour l'avion de combat multirôle "Rafale", le M88-2 est un moteur double corps - double flux avec post combustion de nouvelle génération offrant à la fois un rapport poids-poussée performant, une grande facilité de maintenance, une excellente fiabilité et de faibles coûts d'utilisation.

Il intègre des technologies de pointe : disques aubagés monoblocs, chambre de combustion non polluante, aubes de turbines HP monocristallines, revêtements céramiques et matériaux composites.

Le démonstrateur M88-1. A la différence de ses prédécesseurs, le M88 a bénéficié d'une phase de démonstration remontant à la fin des années soixante-dix. Des essais partiels de composants destinés au corps haute pression (HP) ont été suivis par l'intégration de ces éléments en un corps HP complet en 1987 et capable d'une température maximale de turbine de 1 700°K (1 527°C).

Le premier démonstrateur a commencé ses essais en janvier 1984. Deux moteurs de démonstration, désignés M88-1, ont été construits et ont fonctionné au banc d'essais sol entre 1984 et 1988. Ce programme complet de démonstration a permis d'atteindre la température record de 1 850°K (1 577°C), au mois de février 1987. Pour mieux situer cette avancée, il est intéressant de noter que la température d'entrée turbine du F-404 est de 1 700°K, celle du F-110 de 1 650°K (1 377°C), celle du M53 est inférieure à 1 500°K (1 227°C). Dotés d'un certain nombre d'équipements du M53 (comme par exemple les régulateurs), ces deux moteurs de démonstration ont permis de définir le cycle et l'architecture du futur M88-2. Aujourd'hui ces deux machines sont respectivement exposées dans le musée de l'Air et de l'Espace du Bourget et celui du groupe Safran de Melun-Villaroche.

Délivrant de 50 à 75 kN de poussée avec postcombustion (11 250 à 17 000 lb), le moteur comporte un compresseur axial double corps à 9 étages, 3 étages basse pression (BP) muni de vannes de guidage à géométrie variable et 6 étages haute pression (HP) avec des redresseurs à calage variable. Il est muni d'une chambre de combustion annulaire de dimension réduite et d'un canal de rechauffe équipé de bras radiaux. La turbine axiale, refroidie, à deux étages : 1 étage HP et 1 étage BP. La tuyère de type convergente est équipée de volets chauds et de volets froids.



Vue écorchée du M88-2 (moteur de développement)

Le M88-2. Basé sur un nouveau corps HP capable d'une température maximale de turbine de 1 850°K, le développement du M88-2 a été lancé fin 1986 avec 9 moteurs pour les essais aux bancs de sol, de vol simulé, et pour les essais en vol sur l'Avion de Combat eXpérimental ACX/Rafale A et avec 15 moteurs pour la motorisation des quatre avions prototypes " Rafale " D.

La première rotation du M88-2 au banc d'essais sol a eu lieu en février 1989, le premier essai en vol sur ACX/" Rafale " A s'est effectué le 27 février 1990 et le premier vol sur ACT/"Rafale" D a été réalisé en mai 1991.

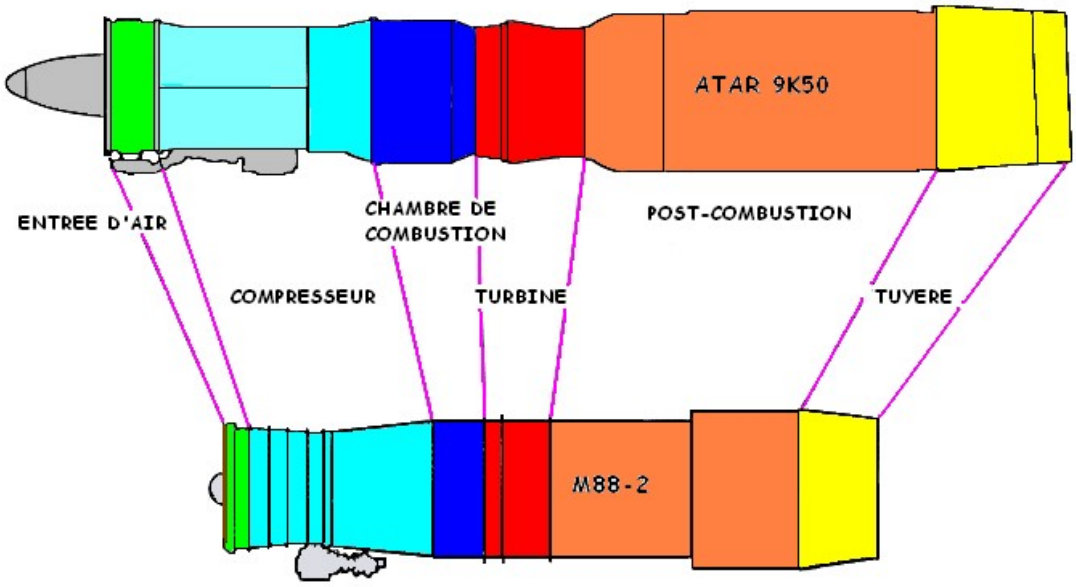
Rafale C01. Les traditionnelles entrées d'air latérales en demi-cercle avec leurs souris, apparues sur le Mirage III ont disparues. Celles-ci étaient très efficaces aux hautes vitesses, mais peu adaptées aux manœuvres violentes du combat aérien rapproché.

Le M88 en quelques chiffres :

• Le réacteur est composé de 1 500 éléments principaux et plus de 100 000 pièces.

• Il faut un peu moins de 18 mois au total pour le fabriquer et environ 36 jours pour assembler entièrement ce moteur - de la réception des pièces jusqu'aux derniers essais au banc.

Par rapport à un réacteur de poussée voisine mais de génération précédente, l'utilisation de nouvelles technologies a permis de réduire le volume de 36%, d'alléger la masse de 45% et de diminuer la longueur de 40%. Autre comparaison : avec une taille et une masse équivalente au réacteur Adour Mk 102 du Jaguar, le M88-2 délivre deux fois plus de poussée. Très compact, le M88-2 offre un rapport poussée/masse particulièrement élevé, proche de 9 ; pour le même nombre d'étages de compresseur, le rapport de pression est passé de 6 à 24,5, pour un débit d'air de 65 kilos par seconde.



Comparaison Atar 9K50 – M88-2

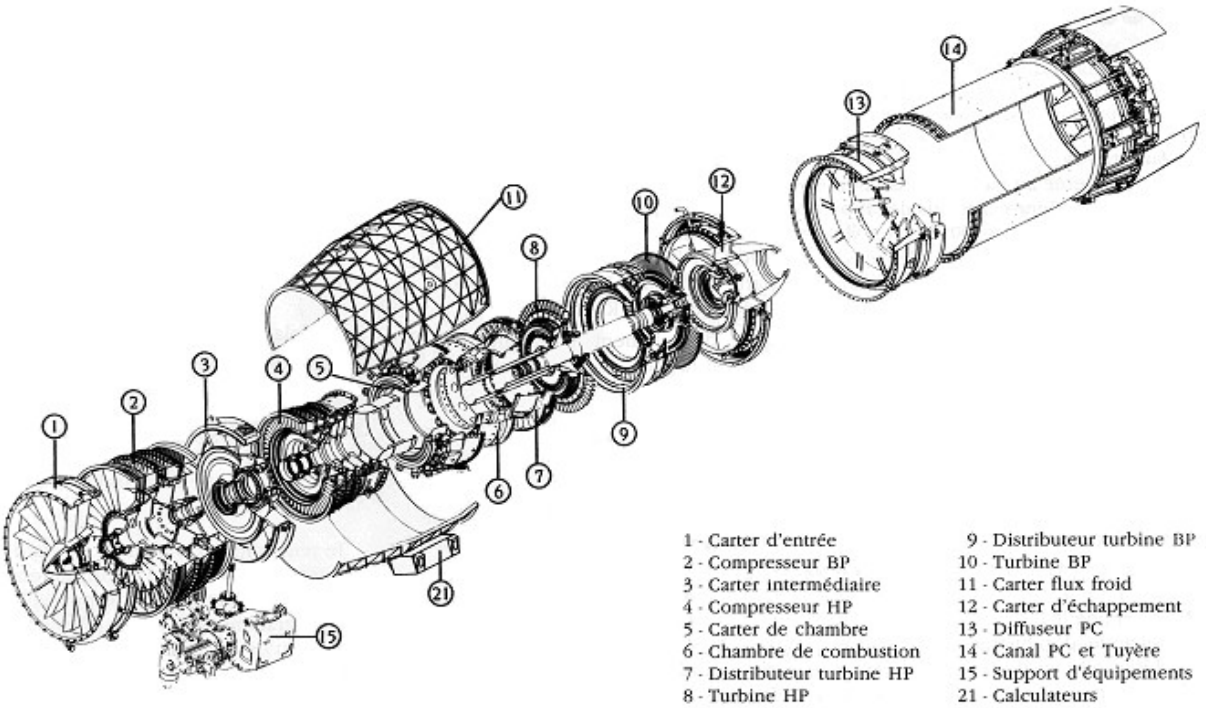
Ce moteur possède une qualité exceptionnelle : un temps d'accélération de 3 secondes à peine entre le ralenti et le plein gaz PC, sans restriction de mouvement de manette dans tout le domaine de vol et sous des facteurs de charge de – 3g à + 9g. Ces performances s'expliquent par l'adoption d'un système de régulation électronique numérique à pleine autorité redondante (FADEC) : deux calculateurs assurent la régulation numérique qui, par le biais de ses 160 lois générales (40 pour le M53-P2), minimise la charge de travail de l'équipage ainsi que celle des mécaniciens et d'une rechauffe étudiée spécialement pour cet objectif. D'où l'expression employée chez Snecma " le moteur est suspendu à son logiciel ".

ACX/"Rafale" A

" Rafale " C01

En effet la mécanique a disparu et l'électronique commande le réacteur dans tout son domaine de fonctionnement, du ralenti au plein gaz PC. De plus chaque moteur comporte une double chaîne de régulation, c'est-à-dire deux calculateurs indépendants, des capteurs et des actuateurs doubles ainsi que des alimentations séparées. Les harnais électriques qui relient entre eux ces différents équipements sont au nombre de plus de 400 sur le moteur et leur technologie, quatre fois plus légère que le M53-P2, est issue des faisceaux électriques montés sur les moteurs de Formule 1 Renault.

Rafale Il est également à noter que le moteur M88-2 permet au " Rafale ", en configuration lisse, d'effectuer de la " super croisière ", c'est à dire le dépassement de la vitesse du son sans l'utilisation de la rechauffe, toutefois dans un domaine limité (Mach 1,2 / 1,3 à 15 000 mètres d'altitude). En vol, le groupe de propulsion permet à l'avion multirôle d'évoluer dans une gamme de vitesses allant de 100 kt à Mach 1.8. Par rapport au Mirage IV qui mettait 5 minutes pour atteindre Mach 1.6, 20 secondes suffisent au biréacteur polyvalent pour passer de 250 kt à 600 kt.


1 - Carter d'entrée
2 - Compresseur BP
3 - Carter intermédiaire
4 - Compresseur HP
5 - Carter de chambre
6 - Chambre de combustion
7 - Distributeur turbine HP
8 - Turbine HP
9 - Distributeur turbine BP
10 - Turbine BP
11 - Carter flux froid
12 - Carter d'échappement
13 - Diffuseur PC
14 - Canal PC et Tuyère
15 - Support d'équipements
21 - Calculateurs

Découpage modulaire (moteur de développement). Il se différencie extérieurement des moteurs de série par un canal flux froid carroyé en titane et la tuyauterie de mise à l'air libre de ventilation qui court tout au long du canal PC.

Au niveau des matériaux, le M88 intègre les technologies les plus récentes :

- disques aubagés monoblocs (DAM) pour les premiers étages du compresseur BP,
- aubes de turbine HP monocristallines (AM 1) ; ces aubes, à refroidissement interne par circulation d'air dans une cavité et à refroidissement externe par un film d'air froid, ont été conçues pour supporter des températures de 1 600°C, soit 300°C au-dessus du point de fusion de l'alliage,

Pour montrer la complexité d'une aube de turbine HP, il faut savoir qu'une aube qui la compose (60 au total) mesure 5 cm de long et pèse environ 250 g. Elle supporte une force centrifuge de 25 tonnes à l'arrachement, travaille à 300°C au-dessus de sa température de fusion, développe 500 Ch (300 kW) et coûte le prix d'une petite berline.

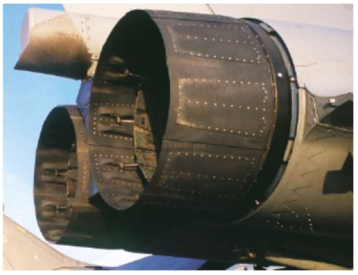
- disques du corps HP en métallurgie des poudres, avec l'alliage N18 pour les moteurs M88-2 E1 et Inconel pour les moteurs M88-2 E4,
- revêtement céramique (zirconate d'yttrium) sur les aubes refroidies permettant un gain de 100 à 150°C,
- matériaux composites à base de fibres de carbone et résine PMR15 pour les parties froides : carter du canal flux froid à l'intérieur duquel la température ambiante est de 300°C,

Compresseur BP

Compresseur HP

Disque de turbine

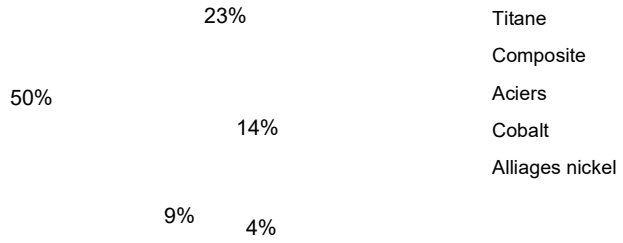
- matériaux composites à matrice céramique (CMC) pour les parties chaudes de l'arrière corps : volets chauds qui doivent soutenir une température d'environ 850°C et volets froids de tuyère dont la température d'exploitation se situe entre 600 et 650°C. De type Carbone/SiC, le matériau est réalisé à partir d'une texture multicouche qui lui confère une moindre sensibilité au délaminage et permet un gain de masse voisin de 50% par rapport à une version en Inconel 718.



Volets froids de tuyère

Cet arrière-corps a la particularité :

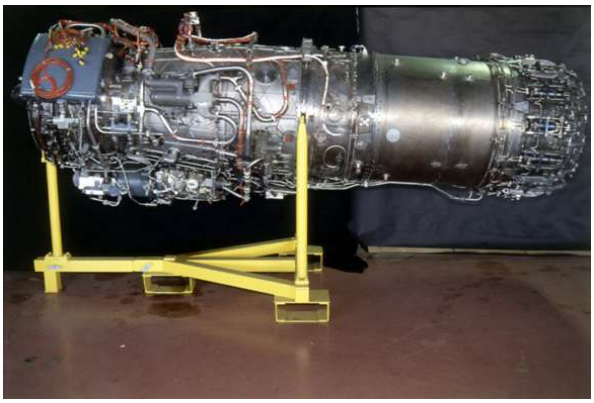
- de participer à la régulation du moteur par sa tuyère à sections variables,
- de contenir et canaliser la flamme de la post-combustion par sa chemise de protection thermique et ses pièces de tuyère en matériaux hautement réfractaires,
- de constituer la partie arrière de l'avion, par sa tuyère secondaire.



Répartition des matériaux

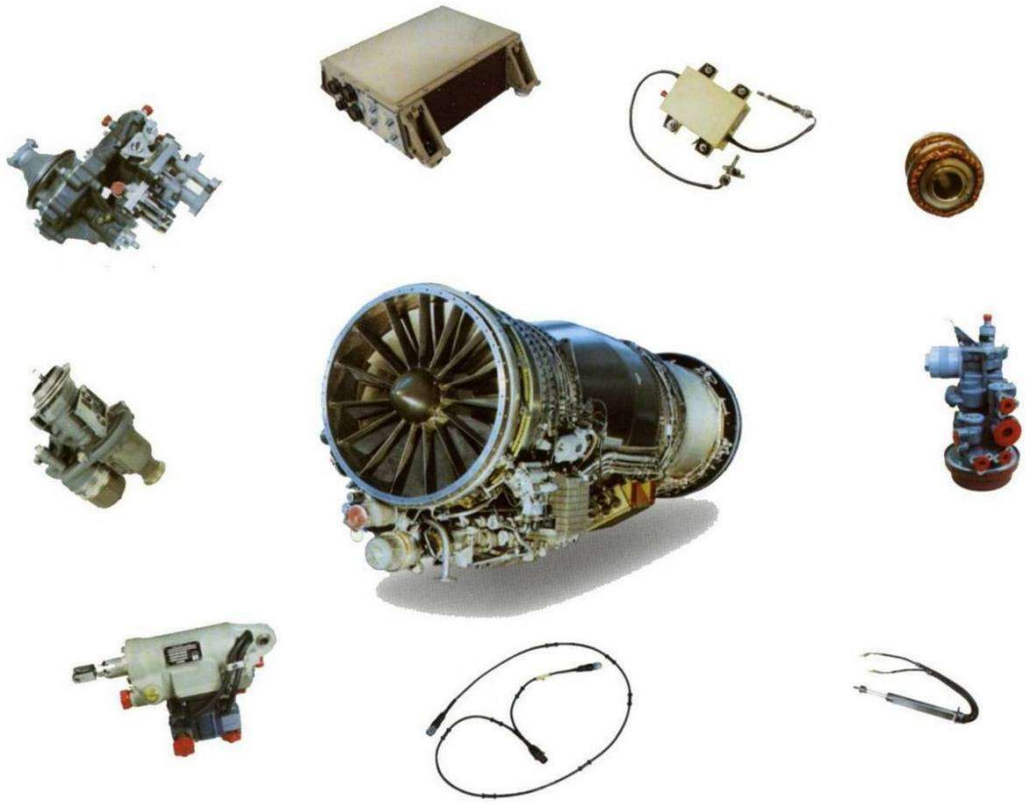
Des avancées importantes ont été appliquées au moteur pour en réduire la signature électromagnétique (EM) et infrarouge (IR). Le moteur du "Rafale" est le premier turboréacteur militaire français à présenter des caractéristiques de furtivité dès sa conception. Ainsi la signature électromagnétique du moteur est notablement réduite par l'emploi d'un traitement anti-radar au niveau du carter d'entrée à dégivrage et par l'utilisation de matériaux composites au niveau des volets chauds et froids de la tuyère.

Sa signature infrarouge est faible grâce au système d'accroche flammes et de combustion appelé DRAC (Discrétion Rechauffe Arrière Corps), aux volets chauds qui ne peuvent être vus de l'arrière et au flux froid entre les volets chauds et les volets froids. Ce flux froid est créé par le vent relatif généré par l'avion en mouvement et pénètre entre les deux types de volets, ce qui a pour effet de mélanger les gaz d'éjection chauds avec de l'air froid. En supersonique, la diminution de la signature infrarouge est obtenue par l'utilisation de la super croisière. La discrétion visuelle est assurée par une chambre de combustion à faible émission de fumées.



Démonstrateur M88-1 n° 880002 (1984)

Moteur de développement M88-2 n° 222 (1991)



Equipements du système de régulation

Le projet de dérivé civil M123. Au cours de la décennie 1990, le motoriste avait étudié un dérivé civil de son moteur militaire baptisé CFM88 et connu initialement sous le nom M123. Le projet visait à couvrir une gamme de poussées capable de répondre aux multiples projets d'avions de l'époque avec trois catégories : les avions de transport régional, les avions d'affaires très haut de gamme et les futurs avions de transport militaire.
Utilisant une partie des technologies développées pour le moteur du Rafale, il empruntait le corps haute pression mais un peu plus petit que celui du M88-2. Snecma avait en effet appliqué un coefficient réducteur pour que le CFM88 soit exactement dans la gamme de poussée demandée par les avionneurs pour motoriser les avions régionaux d'une capacité de 70 à 120 places.

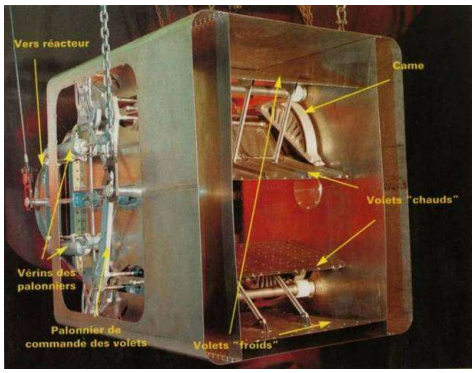
Le projet a été étudié dès le départ pour donner naissance à une famille de moteurs, grâce à une conception modulaire autour du corps haute pression. Deux projets de turboréacteurs ont été proposés aux avionneurs, l'un développant une poussée de 12 000 à 15/16 000 livres, l'autre une poussée de 15 000 à 20 000 livres. La différence entre ces deux projets résidait dans leur système basse pression. Le "petit" CFM88 avait une soufflante de 44" (1 mètre) de diamètre, avec un compresseur basse pression à deux étages et une turbine basse pression à trois étages pour un taux de dérivation de 4.

Le second CFM88 avait une soufflante de 55" (1,4 mètre) de diamètre, avec un compresseur BP à trois étages, une turbine BP à quatre étages et un taux de dérivation de 5,7. Tous les deux utilisaient le même corps haute pression avec un compresseur HP à 7 étages, soit un de plus que pour le M88, et une turbine HP à un étage.

L'architecture générale du moteur ressemblait à celle d'un CFM56, le corps HP étant supporté par deux paliers, les paliers 3 et 4 (inter arbre) et le corps BP par trois paliers, les paliers 1, 2 et 5.

Le projet avorta du fait de la forte concurrence entre les grands motoristes occidentaux.

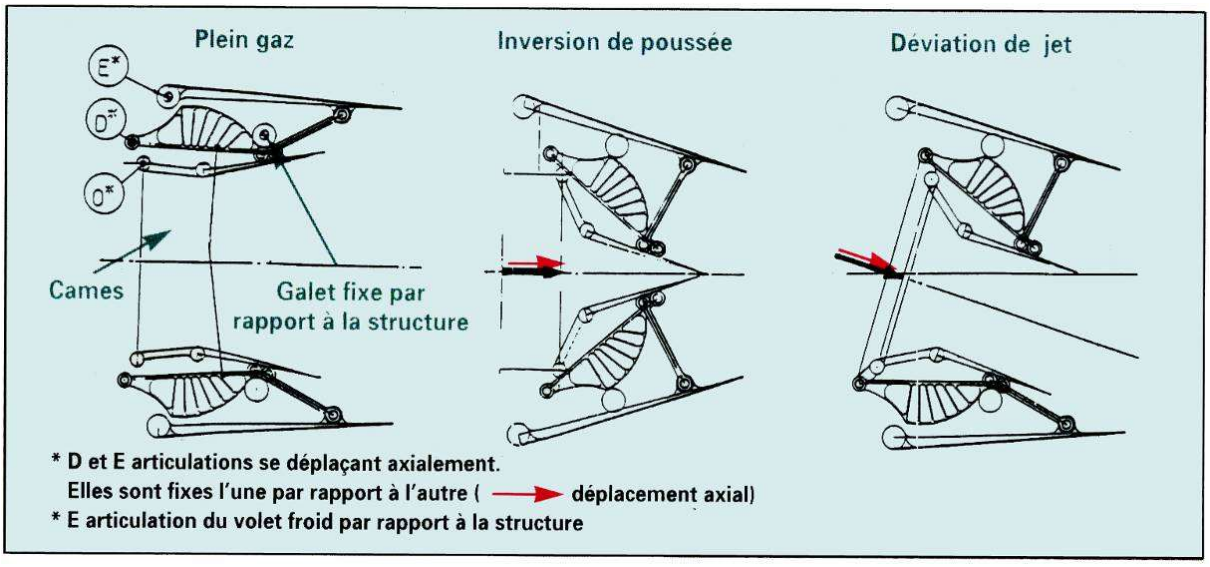
La poussée dirigée. Au début des années quatre-vingt-dix, la Snecma a étudié la poussée dirigée en proposant des tuyères orientables qui donnent une plus grande manœuvrabilité aux avions de combat, réduisent leur distance de décollage et d'atterrissage ainsi qu'une meilleure furtivité.



En 1992, le motoriste a déposé un brevet et réalisé une maquette fonctionnelle équipée d'un système à doubles volets entraînés par cames et palonniers.

Ce développement a conduit à concevoir une section d'éjection rectangulaire qui offre, pour une même surface d'éjection, un périmètre supérieur à une tuyère de forme circulaire. D'où un échange des gaz d'éjection chauds avec l'air froid ambiant réalisé sur une plus grande surface, et donc une meilleure discrétion vis-à-vis du rayonnement infrarouge. En outre une section rectangulaire permet de mieux fixer les volets mobiles permettant la déviation du jet.

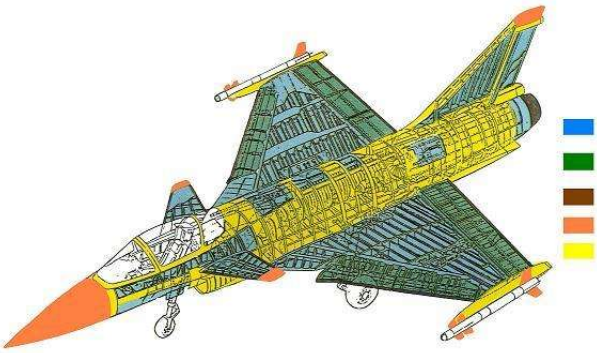
Plutôt que de reconduire les solutions étudiées par les américains (volets mobiles indépendants comme sur le F-15 S/MTD, la Snecma a préféré miser sur une technologie originale. Il s'agissait toujours d'un système de volets assurant une déviation bidimensionnelle des gaz d'éjection mais reposant sur le concept des doubles volets propre à tous ses moteurs militaires. En effet, les tuyères des moteurs français possèdent des volets " froids " qui canalisent l'air froid entourant le moteur, et des volets "chauds" classiques qui adaptent l'ouverture de la tuyère au fonctionnement du réacteur et au Mach de l'avion. Outre un bon refroidissement du moteur, ce courant d'air froid assure un meilleur mélange des flux, et donc une meilleure traînée.


Plein gaz
Inversion de poussée
Déviation de jet
E*
D*
O*
Cames
Galet fixe par rapport à la structure
* D et E articulations se déplaçant axialement.
Elles sont fixes l'une par rapport à l'autre (→ déplacement axial)
* E articulation du volet froid par rapport à la structure

A la différence des tuyères déjà expérimentées par les américains, les vérins montés n'attaquaient pas directement les volets de déviation. Ils intervenaient par l'intermédiaire d'un palonnier qui orientait les volets grâce à deux cames (en haut et en bas de la tuyère). Le modèle de tuyère orientable a une section carrée d'un mètre de côté et sa masse est de l'ordre de 150 kg environ. Il pouvait dévier les gaz d'un angle de 15 à 20 ° vers le haut et bas.

Malgré une plus grande complexité mécanique que les systèmes habituels, le concept offrait le gros avantage de lier et de rendre solidaires les mouvements des volets, supérieur et inférieur. Le mouvement était donc plus souple, plus précis et surtout plus sûr. En cas de panne d'un vérin, les mouvements pouvaient continuer à se faire dans le même sens.

Autre plus du système : la possibilité de pouvoir faire fonctionner le moteur en reverse (voir illustration), et d'avoir une plus grande furtivité grâce au courant d'air froid qui entoure la tuyère.

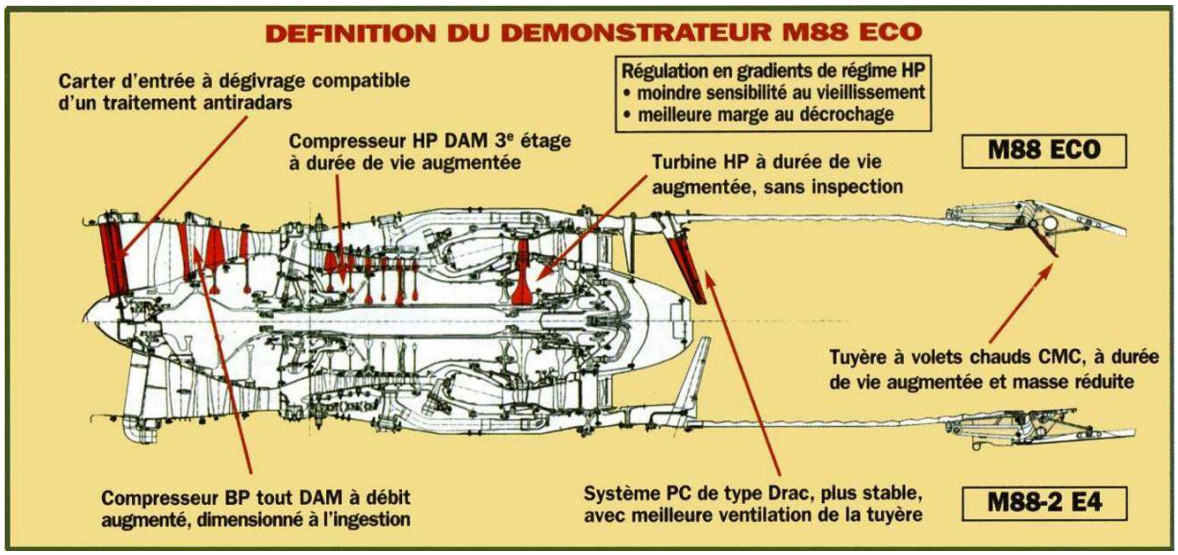


Projet Novi avion yougoslave

Les dérivés du M88. Le M88 est conçu pour générer une famille très large de dérivés pour avion de combat : avec le même corps HP, il peut conduire à des dérivés à 9 tonnes pratiquement dans le même encombrement et jusqu'à 12 tonnes avec un système BP plus conséquent.

Vers la fin des années 1980, une première déclinaison du M88-2 d'une puissance de 50.04 kN (11 250 lb) à sec et 75.62 kN (17 000 lb avec rechauffe) était destinée à motoriser le projet du monoplace monoréacteur de combat yougoslave dénommé le "Novi Avion". Conçu par la firme Soko, la définition aérodynamique de l'appareil était similaire au Rafale avec une formule delta-canard et deux entrées d'air semi-ventrales. L'éclatement de la Yougoslavie, en 1991, eu raison du programme.

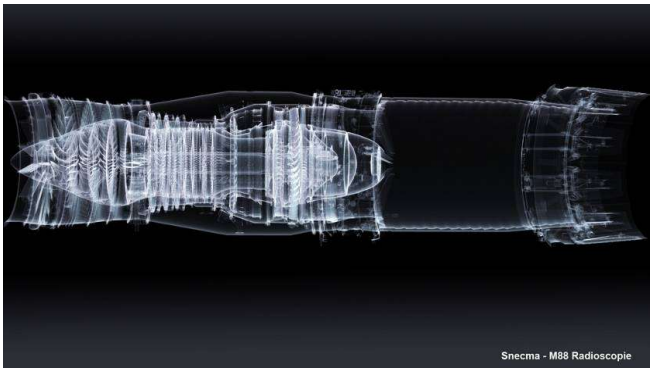
Si les études pour un M88-3 de 90 kN et un M88-4 de 115 kN n'ont pas abouti, elles se sont réorientées vers le M88 Eco (comme Economique). A ce titre, deux démonstrateurs ont été essayés au banc entre 2005 et 2007, l'un ayant déjà démontré la possibilité d'atteindre 88 kN (sur augmentation du débit d'air, imposant une entrée d'air légèrement agrandie), et l'autre a pour but d'augmenter sa durée de vie de 50 %. Les technologies développées sont, entre autres, des aubes monocristallines à barrières thermiques, pour supporter des températures de 2100°C, et des nouveaux régulateurs.


DEFINITION DU DEMONSTRATEUR M88 ECO
Carter d'entrée à dégivrage compatible d'un traitement antiradars
Régulation en gradients de régime HP
• moindre sensibilité au vieillissement
• meilleure marge au décrochage
Compresseur HP DAM 3e étage à durée de vie augmentée
Turbine HP à durée de vie augmentée, sans inspection
M88 ECO
Tuyère à volets chauds CMC, à durée de vie augmentée et masse réduite
Compresseur BP tout DAM à débit augmenté, dimensionné à l'ingestion
Système PC de type Drac, plus stable, avec meilleure ventilation de la tuyère
M88-2 E4

Introduisant de nouvelles innovations technologiques, ce programme technologique, achevé fin 2007, a engendré des gains en coût d'exploitation par l'augmentation des durées de vie des pièces du moteur et en disponibilité opérationnelle du moteur avec des performances accrues.

Le M88-4E. Dans la continuité du plan d'études amont Eco, le programme dénommé " Pack CGP " (Coût Global de Possession) cible prioritairement un nouvel allongement de la durée de vie du moteur, de l'ordre de 40 à 50 % avec la rénovation des modules stator et rotor des parties haute pression (HP). Pour cette évolution qui ne vise pas un accroissement des performances mais bien plutôt une diminution du coût d'exploitation, Snecma a modifié environ 20% du moteur en y intégrant des améliorations dans les modules stators et rotors des parties haute pression. Le compresseur HP à six étages, qui avait déjà subi une profonde amélioration pour l'Etape 4 (M88-2 E4), adopte notamment de nouveaux redresseurs, un nouveau carter arrière et un DAM pour son troisième étage, ce qui rallonge sa durée de vie. La turbine HP reçoit quant à elle de nouvelles aubes redessinées et à refroidissement augmenté. Au final, la masse du moteur est passée de 930 kg à 971 kg.

Renommé M88-4E, le premier réacteur issu du programme CGP a fait ses premiers tours au banc à Melun-Villaroche, au mois de septembre 2009 suivis par des essais en vol à Istres, entre le premier trimestre et la fin 2010, et sa qualification l'année suivante. Courant 2012, les premiers moteurs de série ont été livrés, le M88-4E remplaçant ainsi l'ancien standard, aussi bien pour la France que pour les éventuels clients à l'export, sur les lignes d'assemblage du motoriste. A l'horizon, 2020, tous les M88-2 auront été portés au standard -4E.



Radioscopie du M88-2

Les objectifs du standard - 4E sont de réduire le coût de possession du M88 et d'allonger les intervalles d'inspection des principaux modules en augmentant la durée de vie des parties chaudes et des pièces tournantes. Pour certains éléments des parties chaudes, il est possible de supprimer jusqu'à trois inspections sur leur durée de vie. Avec cette nouvelle évolution du M88, c'est 20 % du moteur qui est modifié avec l'intégration d'améliorations dans les modules stator et rotor des parties à haute pression (HP).

La fiabilité et les intervalles d'inspection du M88 sont équivalant à ceux du turbofan F-414 de General Electric qui équipe le F/A 18 E & F "Super Hornet" et E/A 18G "Growler" mais inférieurs au Pratt & Whitney F-100-PW-229 motorisant les F-15 "Eagle" et F-16 "Fighting Falcon". Avec le standard -4E, on arrive à un TAC de 4000 cycles contre 2500 auparavant, soit une amélioration de 60 %. Le TAC, ou Tactical Air Cycle, est une norme Otan dénombrant le nombre "d'impulsions sur la manette des gaz" que peut subir un moteur. Plus le TAC est élevé, plus l'intervalle entre chaque inspection en atelier et chaque dépose est important.

Par attrition naturelle des pièces spécifiques des M88-2, tous les moteurs de la flotte sont progressivement devenus des M88-4E.

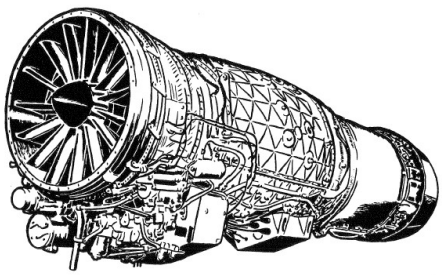
Caractéristiques techniques	**M88-2**	**M88-4E**
Taux de dilution	0,25	0,25
Taux de compression	24	24
Débit d'air	65 kg/s	65 kg/s
Poussée maximale au point fixe avec PC	5 690 daN	5 855 daN
Poussée en maxi sec	3 860 daN	3 915 daN
Poussée au ralenti : Sol Vol	 115 daN 240 daN	 150 daN 240 daN
Consommation spécifique avec PC	1,7 kg/daN/h	1,7 kg/daN/h
Consommation spécifique sans PC	0,8 kg/daN/ h	0,8 kg/daN/ h
TET (Température Entrée Turbine)	1 120 °K	1 055 °K
Longueur avec tuyère	3 600 mm	3 600 mm
Diamètre gabarit hors-tout	900 mm	900 mm
Masse totale	930 kg	971 kg

Nota : les valeurs sont données en atmosphère standard, réacteur avionné au sol et à vitesse nulle.

La variante M88-9. Parallèlement à l'amélioration "Pack CGP", Snecma envisage la production d'une version du M88 développant 9 tonnes de poussée unitaire principalement destinée à l'export pour l'emploi sous les températures équatoriales et en cas de non disponibilité d'avions ravitailleurs.

Dans le cadre des négociations entre la France et les Emirats Arabes Unis (EAU) pour la vente d'une soixantaine de Rafale, Snecma a débuté le développement d'une variante plus puissante de son moteur M88. Cette variante, pour le moment désignée M88-9 (anciennement M88-X), affichera une poussée maximale de 88 kN (contre 75 kN pour le M88-2, actuellement en service) en conditions ISA. Il intéresserait également d'autres clients potentiels de l'avion, comme le Koweït, et pourrait même un jour équiper les forces françaises dans le cadre d'une possible " tranche 4 ". Cette augmentation de poussée, aussi bien avec que sans rechauffe, est en effet un plus indéniable pour l'avion : outre de meilleures performances de croisière (notamment en configuration lourde), il sera également plus performant en combat, avec en particulier un temps d'interception réduit de 16 %. A noter que les coûts de maintenance ne devraient pas augmenter pour autant et devraient rester égaux à ceux du M88-4E.

Ce développement s'appuie essentiellement sur les résultats du programme " Eco ", où la faisabilité d'un moteur à poussée augmentée de la classe des 9 tonnes avait été démontrée. Ce PEA (Plan d'Etudes Amont) visait à étudier des technologies permettant de rendre le M88 plus puissant et plus économique.



Le M88-9 intègre un certain nombre d'évolutions technologiques ayant comme base la configuration CGP : c'est près de 20% du moteur qui sont affectés, essentiellement sur les parties basse pression (BP). Ainsi cette variante incorporera un nouveau compresseur BP au rapport de pression de 4,3, au diamètre plus important permettant ainsi d'augmenter le débit d'air du moteur de 65 kg/s à 72 kg/s. Le taux de compression sera également accru, dans les proportions démontrées durant le programme Eco (un taux de compression de 27 y a été démontré). Les trois étages de ce module seront des DAM en titane. Du fait de son nouveau comportement aérodynamique, le moteur nécessitera en outre des réglages spécifiques de postcombustion et de la régulation numérique (Fadec).

Au final, sa masse ne sera supérieure que de 41 kg et son rapport de poussée sur masse, de 9,2 (contre 8,4 pour le M88-2).

Côté avion, l'intégration de ce nouveau compresseur BP nécessitera d'agrandir légèrement la taille des entrées d'air, de renforcer des fixations et des cadres, d'apporter de légères modifications aux logiciels de gestion des M88 et des CDVE ainsi que la révision de certaines interfaces avion-moteur. Le M88-9 aurait pu être disponible pour la livraison des premiers avions en 2013.

Si la version à durée de vie allongée intéresse les armées françaises, la version "88 kN" pourrait bénéficier à la Marine qui catapultera des avions très lourds (20 % de poussée supplémentaires) ou pour l'Armée de l'Air afin de fournir l'énergie nécessaire à la future nacelle de brouillage de puissance.

Le programme THEO. En 2003, la Snecma a lancé un autre programme de démonstrateur, baptisé THEO (turbine à haute efficacité optimisée), afin de tester des aubes haute pression offrant des performances supérieures en termes de refroidissement et de tenue en température. Les aubes en alliage monocristallin supportent des vitesses de rotation de 15 000 tours/minutes et des températures de plus de 1 500 °C. C'est une technologie d'avant-garde que maîtrisent très peu de sociétés dans le monde, mais le motoriste cherche à aller encore plus loin. Le but est, dans le même encombrement et avec la même compacité, de créer une nouvelle version du M88 pour soit porter la poussée à

9 tonnes, soit obtenir des durées de fonctionnement entre deux visites toujours plus longues. Ce programme d'acquisition technologique est de concevoir de nouvelles technologies applicables à l'horizon 2015.

Le M88-2 en service opérationnel. L'avion de combat polyvalent français, tout autant bombardier stratégique qu'appareil de supériorité aérienne, a été mis en service avec plusieurs années de retard en raison de contraintes budgétaires : cinq années pour la version navale (M) et dix années pour les deux versions air (B & C). Au mois d'août 2013, la flotte de biréacteurs français avait franchi le cap symbolique des 100 000 heures de vol réalisées dans les forces dont plus de 16 000 heures en opérations extérieures, en Afghanistan, en Lybie, au Mali, en Irak et en Centrafrique. En début 2014, la flotte totalisait plus de 120 000 heures de vol.

Commandé à soixante exemplaires pour servir à bord du porte-avions à propulsion nucléaire Charles de Gaulle, le Rafale M est en dotation sur la base de Landivisiau où il arme trois flottilles : 12F " Canard " (2001), 11F " Hippocampe " (2011) et 17F " Quinquina " (2016). Dans l'Armée de l'air, il équipe trois escadrons de combat basés à Saint-Dizier : EC 1/7 " Provence " (2006), EB 1/91 " Gascogne " (2009) et ETR 2/92 " Aquitaine " (2010) ; deux escadrons sur la base de Mont-de-Marsan avec l'ECE 5/330 " Côte d'Argent " ou Escadron de chasse et d'expérimentation et l'EC 2/30 " Normandie Niemen " (2011) ; un escadron sur la base d'Orange avec l'EC 1/5 " Vendée " (2024). Depuis la fin de l'année 2011, il est également en dotation au sein de l'EC 3/30 " Lorraine " à Al Dhafra aux Emirats Arabes Unis.

En dépit d'un développement sans faute, les premiers " Rafale " M ont mis en avant quelques défauts de jeunesse comme la courte durée de vie et l'entretien excessif du M88-2. A ce jour la flotte " Rafale " n'a eu à déplorer, au printemps 2007 lors de l'opération Serpentaire, qu'un retour à bord du porte-avions Charles de Gaulle en configuration monomoteur, provoqué par une coupure automatique générée par un bug de logiciel.

" Rafale " M2 et M28, flottille 12F

Moteur de technologie très avancée, le M88-2 a fait l'objet d'une mise en service opérationnelle très prudente en 2001. L'inspection des parties chaudes telles que les disques de turbines et les étages 4, 5 et 6 du compresseur HP est graduellement passée de 150 à 500 heures de vol soit deux ans sans dépose. Le M88 a fait appel dans sa conception et réalisation à la métallurgie des poudres. Une technologie très innovante. Mais le motoriste ne connaissait pas au départ les lois précises de propagation de fissures propres à cette technologie. D'où, pour ne pas prendre de risques, des vérifications fréquentes de l'état des modules, des démontages et renvois en usine pour contrôle. Et comme le nombre de modules n'avait pas été calibré en fonction de cette situation, un impact sur la disponibilité des avions a pu être noté. Face à ce problème d'inspections, la Snecma a lancé un programme visant à allonger la durée d'utilisation du M88 en abaissant la température devant turbine afin d'augmenter la longévité des parties chaudes. Ceci a conduit au M88-2 "Etape 4" qui, outre une augmentation des intervalles entre deux inspections, possède une consommation spécifique améliorée de 3 à 4% tout en conservant la même poussée de 75 kN (17 000 lb). Actuellement la durée de vie des parties chaudes est de 700 heures.

" Rafale " B, EC 1/7 Provence

En service opérationnel dans l'armée de l'Air depuis fin 2006 et la marine française depuis fin 2000, le parc des moteurs en service, tous au standard " Etape 4 " depuis le début de l'année 2007, totalise à ce jour plus de 350 000 heures de fonctionnement. Actuellement, un Rafale réalise environ 250 heures de vol chaque année. Son utilisation opérationnelle est prévue jusqu'en 2050.

Nombre de pilotes soulignent les performances du Rafale par rapport au Mirage 2000. Il monte beaucoup plus vite et atteint 40.000 pieds en deux minutes seulement en configuration de combat, soit 30 secondes de moins qu'un Mirage 2000. Même avec quatre missiles et un bidon, l'avion prend une pente de 45 degrés jusqu'à 10 000 pieds avant de progressivement lâcher la main. Son autonomie est excellente, et l'avion peut rester en l'air entre 1 heure 30 et 2 heures dans cette configuration.

La sobriété des réacteurs M88-2 est d'ailleurs plébiscitée par les pilotes. Si la situation l'exige, l'avion est en mesure d'attendre l'ordre de décollage, moteurs tournants, au point d'arrêt avec une consommation globale de 12 kg/min contre 17 kg/min pour un Mirage 2000, pourtant monomoteur. En une heure dans de telles conditions, le Rafale ne consomme que 720 kg, une misère pour un avion emportant 5 700 kg en tout avec un réservoir ventral. L'avion est tellement fin qu'il peut accélérer en supersonique et tenir la croisière supercroisière plein gaz, sans postcombustion.

" Rafale " B n°129, EC 2/30 Normandie Niemen

Bien que l'appareil soit bimoteur, ses automatismes très poussés lui permettent de démarrer aussi vite qu'un Mirage F1 ou un Mirage 2000. En toute logique, le temps de mise en route devrait être plus long, surtout avec des réacteurs double-flux double-corps qui démarrent chacun plus lentement que le M53-P2 double-flux monocorps du Mirage 2000, mais les innovations techniques permettent de compenser la différence.

L'appareil français a démontré sa flexibilité, en 2009, lors d'un exercice aérien, aux Emirats arabes unis (EAU), en s'opposant à ses principaux compétiteurs sur la scène internationale dont notamment le Lockheed F-22A " Raptor " et l'Eurofighter " Typhoon ". Le bimoteur français a abattu virtuellement 61 avions de combat hostiles.

A la fin de l'automne 2009, le Rafale a démontré ses performances en combat tournoyant contre des F-22A " Raptor " : moins lourd que le bimoteur américain qui (volontairement ou non) profite pleinement des avantages de sa tuyère orientable qu'à basse vitesse, le bimoteur français s'est montré plus manœuvrant en "dogfight" à moyenne et haute vitesse. Sur les six combats un contre un simulés et limités au canon qui opposèrent les deux types d'avions dans les cieux émiriens, seulement deux virent la destruction – virtuelle – du Rafale. Les autres

rencontres se conclurent sans vainqueur. Une " performance " pour le Rafale face au chasseur le plus moderne du monde présenté comme particulièrement agile grâce à ses tuyères orientables et qui plus est furtif.

Pour mémoire, les 70 000 livres de poussée de ses deux turbofans Pratt & Whitney F-119 confèrent au F-22A " Raptor " une accélération qui permet à l'avion d'accélérer de 60 à 600 nœuds en une quinzaine de secondes ; ses deux tuyères orientables donnent à l'avion un surcroît de manœuvrabilité sur l'axe de tangage.

Parallèlement à cette joute, deux combats aériens – combats à vue au missile à guidage infrarouge (IR) et au canon – ayant opposé les Rafale aux " Typhoon " se sont soldés par sept victoires au bénéfice des premiers et zéro pour les seconds ; le seul Rafale considéré comme détruit l'ayant été pour être descendu en deçà du plancher de vol autorisé. Quelques temps auparavant, une autre rencontre entre " Typhoon " et Rafale, au large de la Corse, avait également tourné au massacre au détriment des premiers : 8 pertes à 1.

Combat proven. Hormis les opérations menées au-dessus de l'Afghanistan, entre 2007 et 2012, le biréacteur français a démontré son efficacité lors de l'opération "Harmattan", sur la Libye, en 2011, en réalisant 1 655 sorties en sept mois et demi, soit plus de 6 900 heures de vol. Les moteurs ont consommé moins de potentiel que prévu car les missions effectuées comportaient beaucoup de phases de convoyage et se sont également bien comporté en conditions de hautes températures.

Au cours de l'opération "Serval", en janvier 2013, au-dessus du désert malien, le Rafale a également démontré son allonge. Le 13 janvier, quatre Rafale B/C décollent de Saint Dizier, traversent la France, survolent l'Espagne, le Maroc puis la Mauritanie avant de pénétrer au Mali par l'ouest du pays. Ils largent 21 bombes sur divers objectifs avant de mettre cap à l'est pour aller se poser directement à N'Djaména. Cinq ravitaillements, plus de 5 000 km parcourus et 9 h 43 mn de vol pour ce qui devient la plus longue et la plus lointaine mission de bombardement de l'histoire de l'armée de l'air. Au total le biréacteur a cumulé 2 560 heures de vol au-dessus du Mali lors de l'opération " Serval ". Prévue à l'origine comme un simple vol de convoyage, cette mission a au final permis à l'armée de l'Air de démontrer une fois de plus sa capacité à frapper à longue distance depuis la métropole.

En avril 2014, au cours d'un vol d'entraînement des FAS, l'appareil a battu son record d'endurance en volant pendant 10 h 35.

Pour mémoire, l'autonomie maximale de l'avion est conditionnée par la consommation en huile du moteur (entièrement récupérée), qui peut atteindre 0,15 litre par heure. Le réservoir d'huile intégré au support d'équipements ayant une contenance de 12 litres, la durée maximale d'une mission est de plus dix heures d'affilée …

Carnet de commandes. A l'origine du programme, les prévisions pour l'Aéronavale étaient de 86 Rafale M embarqués. L'Armée de l'Air comptant sur 250 appareils (225 monoplaces et 25 biplaces). En 1992, les besoins seront révisés à la baisse et profondément modifiés : 234 pour l'Armée de l'Air (dont 95 monoplaces C et 139 biplaces B) et 60 monoplaces M pour la Marine.

En novembre 2008, le nombre est encore réduit de 294 Rafale à 286 appareils : 228 pour l'Armée de l'Air et 58 pour la Marine.

Originellement appelé Rafale BM, le Rafale N, une version biplace, a été projetée pour l'Aéronavale mais les contraintes budgétaires et les coûts de formation ont conduits à son annulation.

Quatorze ans après la mise en service opérationnelle dans l'armée française, l'Egypte est devenu le premier client à l'export, en février 2015, avec une commande de 24 appareils (16 biplaces et 8 monoplaces) livrés la même année. Trois mois plus tard, au début du mois de mai, le Qatar est devenu le troisième acquéreur avec une commande de 24 biréacteurs, complétée en décembre 2017 par 12 appareils supplémentaires. En septembre 2016, l'Inde, qui a déjà acquis auprès de la France des Dassault Ouragan, Mystère IV et Mirage 2000, a commandé un total de 36 appareils. Ces deux premiers clients étrangers sont exactement les mêmes qu'au début des années 1980 : ils avaient alors passé commande de Mirage 2000 EM/BM en 1981 et Mirage 2000

H/TH en 1982. A ce jour, sur les 533 appareils commandés, le carnet de commande à l'export est de 261 appareils.

Rafale DM Squadron 34 " Wild Wolves " / 203 TFW " Storm " basé à Berigat des forces aériennes égyptiennes.
Même livrée grise que les appareils français.
Ils sont immatriculés, pour les monoplaces EMxx et les biplaces DMxx.

Quatorze ans après la mise en service opérationnelle dans l'armée française, l'Egypte est devenue le premier client à l'export, en février 2015, avec une commande de 24 appareils (16 biplaces DM et 8 monoplaces EM) et livrés la même année. En mai 2021, l'Egypte (El Quwat El Gawiya El Masriya) a commandé un second lot de 30 appareils. En septembre 2016, l'Inde, qui a déjà acquis auprès de la France des Dassault Ouragan, Mystère IV et Mirage 2000, a commandé un total de 36 appareils dont 8 biplaces. Ces deux premiers clients étrangers sont exactement les mêmes qu'au début des années 1980 : ils avaient alors passé commande de Mirage 2000 EM/BM en 1981 et Mirage 2000 H/TH en 1982.

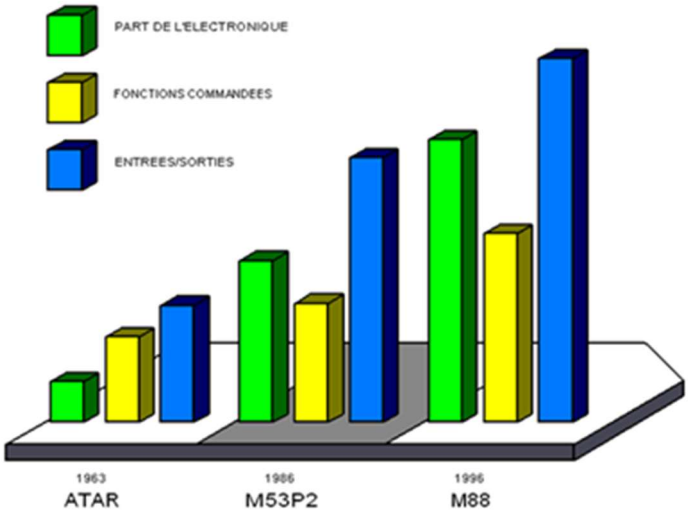
Au début du mois de mai 2015, le Qatar est devenu le troisième acquéreur avec une commande de 24 biréacteurs dont six biplaces, complétée par 12 autres appareils supplémentaires, en décembre 2017. En janvier 2021, la force aérienne grecque (Elliniki Polemiki Aeroporia) a commandé 6 appareils neufs et 12 prélevés sur la dotation de l'armée de l'Air française et en fin mai 2021, la Croatie (Hrvatsko ratno zrakoplovstvo ou HRZ) a commandé 12 appareils d'occasion prélevés sur la dotation de l'Armée de l'air française et livrables en 2024. Au début du mois de décembre 2021, les Emirats Arabes Unis commandent 80 Rafale, livrables à partir de 2026.

En février 2022, l'Indonésie a signé un contrat pour 42 Rafale destinés à la Tentara Nasional Indonesia Angkatan Udara (Force Aérienne de l'armée nationale indonésienne). En fin août 2022, et huitième client, la Serbie a signé un contrat pour 12 Rafale dont trois biplaces. En avril 2025, l'Inde a commandé 26 avions supplémentaires de chasse Rafale, dont 22 en version Marine et 4 biplaces.

Système de régulation. Sur un moteur M88, deux calculateurs identiques réalisent la Régulation Electronique Numérique Pleine Autorité Redondante (RENPAR).

Ils acquièrent et traitent en permanence les différents paramètres du moteur et de l'avion nécessaires au logiciel de régulation et à la maintenance du moteur. Le logiciel de régulation élabore les consignes de fonctionnement moteur qui agissent sur les organes hydromécaniques et le boîtier d'allumage.

En fonctionnement, un seul calculateur est actif : le second est prêt à prendre la main en cas de défaillance de la voie active. Les calculateurs changent de conditions (actif/passif) à chaque mise en route moteur.



Evolution des systèmes de régulation

Le nombre de fonctions à commander par le système de régulation est passé de 6, pour l'Atar 9C, à 11 pour le M88, tandis que le nombre d'entrées a presque triplé avec des précisions largement supérieures et une

puissance de calcul 100 fois supérieure à celle disponible sur le moteur M53. Corrélativement, la part prise par l'électronique dans le coût des régulations a crû pour atteindre 60 % sur le M88.

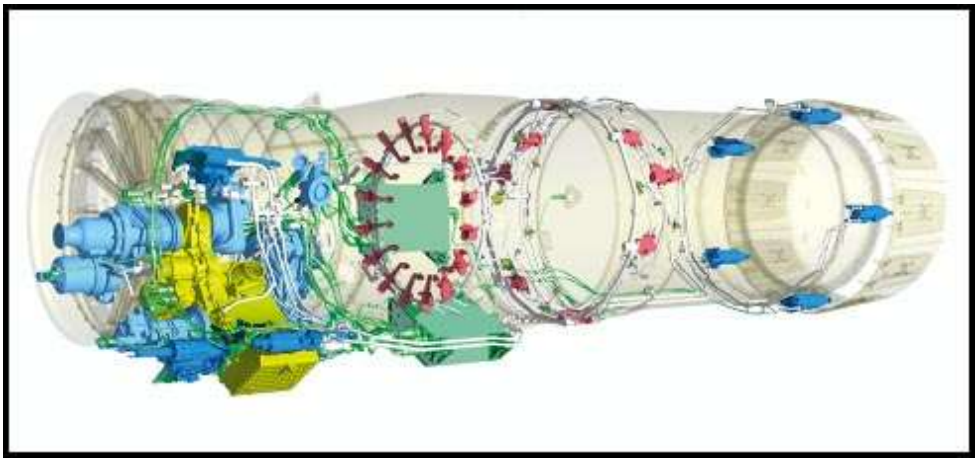
Ce calculateur permet d'obtenir des gains significatifs de masse et d'encombrement qui concourent à la réalisation d'un moteur léger et compact. Les cartes équipées de composants de technologie CMS (composants montés en surface) et de circuits intégrés de type ASIC (application specific integrated circuit) ont permis de réduire leur nombre de 60 % et d'alléger de 25 % la masse du calculateur.

Maintenance. Le turbofan comporte 21 modules interchangeables (dont 7 sont remplaçables en ligne), sans réglage ni équilibrage et de 25 équipements contre 50 pour le moteur M53-P2. La maintenance du M88-2 qui a largement évoluée, permet aux opérateurs d'effectuer de nombreuses interventions en piste, moteur avionné.

L'entretien est caractérisé par :

- des inspections sans démontage grâce aux moyens de surveillance embarqués,
- une dépose et avionnage en moins de 40 minutes par trois personnes, grâce à un Ensemble de Treuils Jumelés (ETJ) permettant d'effectuer la dépose / pose par hissage du moteur, avion sur vérins ou sur roues.
- alors qu'un M53-P2 est à réviser toutes les 75 heures de vol, et bien que l'objectif de départ pour le M88-2 soit de 150 heures, il s'est montré capable de tenir avec 500 heures entre chaque révision,
- la suppression, pour l'armée de l'Air, des essais systématiques au banc après échange d'un module ou d'un équipement. A la différence du M53, qui exige pour sa maintenance une fosse au sol, le M88 est seulement placé à la verticale sur une diligence pour être démodularisé. Il est ensuite placé sur un banc BMR ou Banc de Mise en Rotation. Les mécaniciens injectent alors du carburant dans le réacteur pour effectuer des tests d'étanchéité des tuyauteries puis font tourner le moteur à fort régime sans l'allumer. Après quoi, en moins d'un quart d'heure, sans qu'il ait été besoin de lui faire effectuer le moindre vol d'essai ni même de le mettre en marche ainsi que cela était nécessaire avec la génération précédente, le M88 ainsi vérifié est à nouveau disponible.
  La Marine a, en revanche, fait le choix de conserver son banc d'essais pour tester le M88-2 à bord du porte-avions : une garantie appréciable pour ne pas découvrir une anomalie éventuelle en bout de catapulte.

- la limitation des révisions aux seuls modules concernés.



Architecture du système de régulation

L'indice de maintenance du réacteur, relativement minime, est de 1,2 heure de main d'œuvre par heure de fonctionnement moteur (HMO/HDFM). La durée de vie estimée est de l'ordre de 5000 cycles.

Afin de toujours améliorer les performances de ses moteurs, Snecma mène une politique de Recherche et Développement (R&D) soutenue, et le M88 reste le produit idéal pour évaluer et démontrer sa capacité d'innovation. Ainsi le programme d'acquisition technologique THEO, lancé en 2003, permet au motoriste de concevoir de nouvelles technologies de Turbine HP, applicables à l'horizon 2015.

Au début du XXI^{ème} siècle, si les projets de motorisation d'appareils de combat étrangers n'ont pas abouti, les retombées technologiques du moteur se sont déclinées sur deux programmes : le turbopropulseur européen TP400-D6 d'Europrop International, un moteur triple-corps de 11 000 Ch, équipant le quadrimoteur Airbus A400 M et le nouveau moteur militaire indien destiné à remplacer le " Kaveri " de 9 tonnes de poussée propulsant le chasseur léger supersonique LCA " Tejas ". Dans le cadre du programme Clean Sky, le corps haute pression du M88 est retenu pour équiper le démonstrateur d'un open rotor doté de deux hélices contrarotatives que le motoriste va tester dès 2017.